

Розробка методів ідентифікації інформаційно-управляючих сигналів оператора безпілотного авіаційного комплексу

О. К. Юдін, Р. В. Зюбіна, С. С. Бучик, О. В. Матвійчук-Юдіна,
О. М. Супрун, В. Ю. Іваннікова

Запропоновано методи верифікації та ідентифікації оператора за особливостями формування біометричних ознак мовленнєвого сигналу у системах управління безпілотними авіаційними комплексами.

Розроблено метод ефективної ширини спектру мовленнєвого сигналу, який дозволяє здійснювати ідентифікацію та верифікацію оператора безпілотного літального апарату на основі аналізу інформативних складових відбитків голосу в умовах високого рівня завад різного походження.

Розроблено метод найбільшої інформаційної ваги основного тону, в основі якого лежить використання найбільш інформативних складових спектрального представлення відбитків мовленнєвого сигналу.

Перший метод дозволяє ідентифікувати оператора безпілотного літального апарату по інформативним складовим спектрального уявлення відбитка мовного сигналу в умовах високого рівня перешкод. Високі показники, які досягаються шляхом використання даного методу, отримані за рахунок унікальності обраного простору ознак, які зберігають свої характеристики навіть при досить високому рівні перешкод.

Другий метод забезпечує ідентифікацію диктора безпілотного літального апарату по певного простору унікальних ознак голосу. В якості базових ознак обрано частоти основного тону і обертонів. Такий підхід до вирішення завдання ідентифікації забезпечує високу ймовірність визначення оператора при існуючому досить високому рівні перешкод і дозволяє скоротити час обробки інформації в порівнянні з методом ефективної ширини спектра.

Створення методів та моделей ідентифікації аудіосигналів у системах управління безпілотними авіаційними комплексами забезпечує підвищення рівня завадостійкості та захисту системи керування до втручань не санкціонованим оператором. Їх використання дозволяє створити систему розмежування доступу до процесу управління літальним апаратом і тим самим забезпечити безперервність функціонування інформаційної системи управління безпілотними авіаційними комплексами.

Ключові слова: ідентифікація особи, частота основного тону, параметри мовленнєвого сигналу, безпілотний літальний апарат, сигнали телеметрії, санкціонований оператор.

1. Вступ

Бурхливий розвиток суспільних відносин та їх базової складової – інформаційно-комунікаційних систем вимагає створення нових технологій оброблення, зберігання, передавання і відображення інформації.

Сучасне суспільство не можливо уявити без надання різних класів якісних ІТ-послуг в інформаційних системах (ІС) загального та спеціального призначення. Це стає стратегічно важливим питанням в умовах зовнішньої агресії з боку інших держав у процесах забезпечення й ефективного функціонування всіх ланок державного сектора та безпосередньо особистості [1, 2].

Різке збільшення кількості користувачів та програмно-апаратного забезпечення ІС, зростання вимог до якості процесів оброблення та висвітлення даних спричинило необхідність впровадження інформаційних технологій (ІТ) у процедури аутентифікації та ідентифікації критичної інформації.

Використання біометричних характеристик користувачів інформаційних ресурсів і систем дало дальший поштовх для наукових досліджень з метою створення новітніх технологій на базі унікального простору ознак.

Ефективність оброблення та висвітлення критичної інформації в складних умовах надзвичайних ситуацій, також робота з попередження та виявлення загроз різних типів в реальному масштабі часу вивели на новий рівень інформаційні технології використання безпілотних літальних апаратів. Використання малої безпіотної авіації вийшло за межі тільки військового призначення й отримало значне поширення у різних галузях діяльності суспільства, таких як енергетика, археологія, охорона довкілля, робота за надзвичайних ситуацій та інших. Саме ефективність використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стає підґрунтям для розроблення та вдосконалення інформаційних технологій управління авіаційними безпілотними системами в складних радіотехнічних умовах.

Отже, розроблення сучасних ІТ, методів і моделей управління безпілотними авіаційними комплексами на базі використання унікальних біометричних характеристик вокалізованих сигналів оператора для ідентифікації критичної інформації в процесах розмежування доступу є актуальним науково-практичним завданням.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Технічні характеристики оснащення, комплектація та аеродинамічні параметри безпілотних комплексів, зумовлюють один з головних напрямів сучасних досліджень та розробок БПЛА. В роботах [3, 4] здійснено аналіз технічних характеристик авіаційних систем з точки зору використання автоматизованих комплексів та ергономічного дизайну. Очевидно, що якість отриманих даних досліджень для кожної сфери використання БПЛА залежить від базової технічної комплектації безпіотної системи. Але, в силу різноманіття класифікацій БПЛА, вона не є достатньо повною та стосується вузьких сегментованих класів дронів.

Спираючись на дані, що наведені в багатьох роботах, можна констатувати, що різноманіття моделей та методів приземлення авіаційних комплексів також достатньо вузьке. Діапазон практичних методів можна звести до таких процедур, як ручне керування апаратом, команди на використання парашутного типу

приземлення. Найбільш розповсюдженими рішеннями є методи напівавтоматичного керування [5, 6]. Однак всі ці методи мають ряд недоліків та можуть бути впроваджені лише в практично ідеальних умовах експлуатації. Зазначені методи будуть зумовлювати аварійне використання та експлуатацію безпілотних комплексів за неідеальних умов. Причиною цього є відсутність системи авторизованих та захищених команд оператора щодо виконання базових процедур БПЛА в умовах підвищеного рівня завад та в інших критичних режимах.

Таким чином, одним з прогресивних напрямів досліджень повинно бути вдосконалення та розробка нових методів автоматичного або напів автоматичного керування авіаційними безпілотними комплексами в нестандартних умовах. В роботах [7–9] представлено дослідження щодо управління безпілотними системами шляхом лазерного наведення на комплекс для визначення траєкторії посадки і забезпечення чіткої глісади БПЛА, представлено методи передачі критичної інформації (аудіо, відео) з гарантованою якістю. В цих роботах наведені принципові недоліки запропонованих методів (незахищеність сигналів управління при зміні кліматичних умов експлуатації, а також при штучному втручанні в системи управління не авторизованими операторами), але не вказані напрями вирішення цих обмежень та усунення недоліків.

В роботах [11, 12] наведено дослідження з розробки систем дистанційного зондування поверхні землі на базі БПЛА. Даний напрям надає широкі можливості отримання великих обсягів даних та управлінських рішень в кризових ситуаціях. Головною особливістю використовуваних при цьому методів є швидкодія обробки, якість отриманих відеоданих та ефективність обробки критичної інформації для виконання заданих функцій у визначеному діапазоні маршрутів. Але в зазначених роботах відсутні дослідження щодо систем управління на базі методів протидії високому рівню завад (штучного або природного походження), не розглядається питання ідентифікації оператора при санкціонованому керуванні авіаційними комплексами.

Досліджень, які наведені в роботах [13, 14], демонструють, що основою отримання і обробки критичної інформації для систем управління є визначення найбільш високопродуктивних технологій, методів та практик для зйомки відеоданих для АСУ БПЛА. Випадки отримання відеоданих без втрат якості або з регульованою втратою інформації в умовах штучного втручання не санкціонованими методами досліджено не повністю.

Безпека польотів БПЛА в кризових ситуаціях та критичних технічних умовах досліджується в роботах [14,15]. Зокрема авторські колективи пропонують автоматизовані системи швидкісного перерахунку та вибору безпечних траєкторій для виконання оперативних завдань БПЛА в режимах невизначеності середовищ та попереджень зіткненням. Але безпечна робота бортових комплексів в частково невизначених, неструктурованих середовищах на тлі високого рівня завад різних типів в цих роботах вичерпно не представлена і не досліджена. Виконані в цих роботах дослідження перерахунку траєкторій маршрутів та попередження зіткнень можуть бути використані в ідеальних технічних умовах співвідношення сигнал/шум. Але не розглядається питання штучного

втручання не авторизованими операторами в систему автоматичного перерахунку траєкторій руху безпілотного комплексу.

На даний час широке застосування та науково-прикладний розвиток отримало використання безпілотної авіації в сільському господарстві. Автори робіт [16, 17] обґрунтували та продемонстрували можливість використання БПЛА у сільськогосподарській сфері з застосуванням складних технічних комплексів прийняття рішень на базі багатоінформативних даних. Однак запропоновані методи і моделі використання БПЛА розглядаються тільки для ідеальних технічних умов виконання поставлених завдань. Зазначені дослідження присвячені якості обробки відеоданих в складних умовах попередження зіткнень, але не досліджуються в комплексі з питаннями управління БПЛА в критичних умовах різного класу завдань. Повного аналізу таких методів і технологій не наведено.

В роботах [18, 19] досліджено введення додаткових функцій аудіо контролю траєкторій БПЛА; ідентифікація БПЛА за аудіо сигналами силового устаткування; методи ідентифікації авіаційних комплексів в зонах надзвичайних ситуацій, але не представлені дослідження ідентифікації самого оператора, не досить ґрунтовно вивчено методи ідентифікації інформаційно-управляючих сигналів диктора на тлі високого рівня завдань. Питання введення команд управління БПЛА на базі аудіо сигналів (вокалізованих) взагалі не розглядається.

Останні дослідження програмно-апаратних комплексів з застосуванням БПЛА для військового призначення представлені в [20–22]. Але увага з концентрована лише на найпоширеніших методах обробки та застосування цифрових зображень БПЛА для АСУ.

Широкий спектр ризиків, що пов'язані з потенційною можливістю реалізації несанкціонованих дій в рамках задач БПЛА, досліджено в [23, 24]. Авторами запропоновано методи протидії реалізації загроз при несанкціонованому втручанні в сигнали управління на базі криптографічних методів, кодування або на основі зміни частотного діапазону управління. В роботах [24, 25] обґрунтовано необхідність захисту інформаційних потоків даних на базі сучасних методів криптографії, кодування, ідентифікації БПЛА за різними класами параметрів, захисту критичних даних методами стеганографії. Управління БПЛА на рівні команд з використанням аудіо сигналів санкціонованого оператора, а також розробка процедури захисту критичних даних системи управління методами шифрування, кодування інформаційних потоків або методами стеганографії розглядаються також в роботах авторів [26, 27]. Однак автори наголошують, що при постійному використанні стандартизованих алгоритмів захисту в АСУ БПЛА вони втрачають стійкість та не мають швидкої динаміки зміни в тактичних умовах при штучному втручанні несанкціонованого порушника.

Автори досліджень [27, 28] пропонують систему ідентифікації частотного діапазону роботи силових установок бортового устаткування. Але залишається багато невирішених питань у виявленні та відстеженні траєкторій руху безпілотних апаратів за допомогою сучасних акустичних камер. Відсутнє дослідження ролі оператора БПЛА у прийнятті рішень в критичних ситуаціях управління комплексом.

Ґрунтуючись на здійсненому аналізі наукових джерел можна константувати, що на даний час не вирішено питання управління безпілотними комплексами в

умовах штучного несанкціонованого втручання (не з авторизованими операторами) в системи управління БПЛА. Технічними обмеженнями на вирішення поставленої задачі повинні бути умови управління системою на тлі підвищеного рівня завад при низьких спів відношеннях сигнал/шум. Зазначена проблема також повинна вирішуватись в умовах тактичного управління БПЛА в обмежених часових рамках.

Таким чином, актуальним завданням подальших наукових досліджень, є створення нових методів ідентифікації аудіо сигналів у системах управління БПЛА на базі біометричних характеристик вокалізованого сигналу санкціонованого (авторизованого) оператора.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка методів ідентифікації інформаційно-управляючих сигналів оператора безпілотного авіаційного комплексу. Відміною рисою розроблених методів повинно бути використання біометричних характеристик та найбільш інформативних складових спектру вокалізованого сигналу санкціонованого (авторизованого) оператора на тлі високого рівня завад з урахуванням статистичних методів прийняття рішень. Це дасть можливість підвищити рівень завадостійкості та захисту системи керування БПЛА від не санкціонованих втручань.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань:

- розробити метод ефективної ширини спектру мовленнєвого сигналу з метою проведення ідентифікації та верифікації оператора безпілотного літального апарата;
- розробити метод найбільшої інформаційної ваги основного тону, в основі якого лежить використання найбільш інформативних складових спектрального представлення відбитків мовленнєвого сигналу авторизованого оператора.

4. Опис підґрунття для створення методів для текстозалежної і текстонезалежної ідентифікації оператора БПЛА

Одним із пріоритетних завдань розпізнавання образів є завдання опису словника ознак і класів та знаходження їх меж. Проведений аналіз методів оброблення аудіосигналів у завданнях ідентифікації образів, класифікації об'єктів з допомогою вирішальних функцій, дозволив створити теоретичне підґрунття опису словника ознак об'єктів різних класів [1546,17].

Нехай у словнику існує впорядкований набір параметрів об'єктів – ознаки x_1, \dots, x_N , тоді кожен з об'єктів в N – вимірному просторі ознак, може бути представлений у вигляді вектора $x = \{x_1, \dots, x_N\}$. Для класифікації об'єктів необхідно побудувати граничні функції $F_i(x_1, \dots, x_N)$, $i=1, \dots, m$, що мають такі властивості: якщо об'єкт характеризується ознаками x_1^0, \dots, x_N^0 належить до класу Ω_i , то величина $F_i(x_1^0, \dots, x_N^0)$ має бути найбільшою. Вона має бути найбільшою і для інших значень ознак об'єктів цього класу. Якщо вектор ознак об'єкта, що належить до класу Ω_q визначити як x_q , то має виконуватись нерівність $F_q(x_q) > F_p(x_p)$, $q, p=1, \dots, m$, $q \neq p$. Позначимо F_q , як граничну функцію параметрів ознак простору, отриману експериментальним шляхом, а F_p – гранична функція еталонної моделі ознак.

Таким чином, у просторі ознак системи розпізнавання, межа розбиття виражається рівнянням

$$F_q(x) - F_p(x) = 0. \quad (1)$$

В інформаційній технології управління безпілотними авіаційними комплексами, визначення особи оператора можна розглядати з погляду текстозалежної ідентифікації. В даному випадку в системі використовується фіксований набір портретів команд та визначені характеристики голосу. Складнішим завдання є розгляд текстонезалежної ідентифікації, коли аналізуються голосові характеристики незалежно від змістовного навантаження команд.

У процесі ідентифікації будемо визначати міру близькості або подібності об'єктів у N – вимірному векторному просторі ознак, для чого введемо Евклідову метрику:

$$d^2(w_{pk}, w_{ql}) = \sum_{i=1}^N (x_{pk}^{(i)} - x_{ql}^{(i)})^2, \quad (2)$$

де

$$p, q=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, k_p; l=1, 2, \dots, k_q;$$

$x_{pk}^{(i)}$ – значення i -ї ознаки k -го об'єкта p -го класу, тобто об'єкта w_{pk} ; $x_{ql}^{(i)}$ – значення i -ї ознаки l -го об'єкта q -го класу, тобто об'єкта w_{ql} .

Надалі потрібно буде розглядати міру близькості всіх об'єктів даного класу і міру близькості всіх об'єктів даної пари класів. Як міру близькості об'єктів даного класу W_p , $p=1, 2, \dots, m$, будемо використовувати величину

$$S(W_p) = \sqrt{\frac{2}{k_p} \frac{1}{k_q - 1} \sum_{k=1}^{k_p} \sum_{l=1}^{k_q} d^2(w_{pk}, w_{pl})}, \quad (3)$$

яка буде середньоквадратичним розкидом класу або середньоквадратичним розкидом об'єктів усередині класу W_p , як міру близькості об'єктів даної пари класів W_p та W_q , $p, q=1, 2, \dots, m$ – величину

$$R(W_p, W_q) = \sqrt{\frac{1}{k_p k_q} \sum_{k=1}^{k_p} \sum_{l=1}^{k_q} d^2(w_{pk}, w_{ql})}, \quad (4)$$

яка є середньоквадратичним розкидом об'єктів класів W_p та W_q .

Сукупність ознак об'єктів, що використовують у робочому словнику, можна описати N -мірним вектором $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$, компоненти якого приймають

значення 1 або 0 залежно від наявної або відсутньої можливості визначення відповідної ознаки об'єкта, тобто $\lambda_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$.

З урахуванням λ відстані між двома об'єктами w_{pk} та w_{ql}

$$d^2(w_{pk}, w_{ql}) = \sum_{i=1}^N \lambda_i (x_{pk}^{(i)} - x_{ql}^{(i)})^2. \quad (5)$$

Середньоквадратичні розкид класу і об'єктів класів можуть бути записані відповідно:

$$S(W_p) = \sqrt{\frac{2}{k_p k_q - 1} \sum_{k=1}^{k_p} \sum_{l=1}^{k_q} \sum_{i=1}^N \lambda_i (x_{pk}^{(i)} - x_{pl}^{(i)})^2}, \quad (6)$$

$$R(W_p, W_q) = \sqrt{\frac{1}{k_p k_q} \sum_{k=1}^{k_p} \sum_{l=1}^{k_q} \sum_{i=1}^N \lambda_i (x_{pk}^{(i)} - x_{ql}^{(i)})^2}. \quad (7)$$

Отже, створення методів для текстозалежної і текстонезалежної ідентифікації оператора БПЛА, ставить завдання створення словника портретів базових команд об'єктів управління БПЛА.

5. Розробка методу ефективної ширини спектру вокалізованого сигналу оператора.

Розроблено метод ефективної ширини спектра на базі багатоальтернативних правил прийняття рішення шляхом оброблення спектра вхідного сигналу $S_{spl,i}$ фіксованого діапазону та всіх еталонних спектральних $S_{spk,i}$ моделей зі сформованої бази даних об'єктів різних класів за визначеним простором ознак. Даний метод розроблений для ідентифікації вокалізованого набору команд оператора безпілотного літального апарата за біометричними характеристиками в умовах високого рівня завад [6, 8, 13].

Основним теоретичним підґрунтям процесу оброблення та прийняття рішень про ідентифікацію інформаційного об'єкту повинен бути перехід із часової площини до спектральної, як до найбільш інформативного за кількістю і різноманітністю інструменту аналізу вхідної послідовності сигналу. Зазначений підхід дає можливість підвищити кількісні показники якості ідентифікації за зменшеного обсягу вибіркового простору ознак класу, порівняно з іншими методами.

Таким чином, сформована база даних спектральних портретів мовленнєвих сигналів різних операторів та визначений словник ознак і класів інформаційних об'єктів з метою дальшої їх ідентифікації. Вирішенням проблеми помилок апроксимації та розриву в процесі Фур'є-аналізу є використання віконної функції Хеммінга, що в свою чергу дозволяє зменшити шумову складову.

Залежно від співвідношення амплітуд частотних складових спектра, звук має різне відтворення та сприймається системою ідентифікації, як тон або шум. Було розглянуте спектральне представлення сигналу та встановлені залежності у вигляді чітко виражених піків амплітуд гармонійних складових спектру, що системно повторюються з певним інтервалом частот. Доведено, що кожна така складова відтворює один тон сигналу та повинна сприйматися, як індивідуальна інформаційна характеристика повідомлення.

За випадкову величину було взяте спектральне представлення зразка голосу оператора у вигляді частотного портрету $Ssp_{l,i} = \sum_{i=0}^{N-1} x_{l,i} e^{\frac{-j2\pi i \omega}{N}}$ з Гаусівським розподілом, де $x_{l,i}$ – значення i -ознаки l -го об'єкта, який прийшов на вхід системи для ідентифікації. Подальшим кроком був ймовірнісно-статистичний аналіз спектрального портрету вхідного та еталонних сигналів $Ssp_{k,i} = \sum_{i=0}^{N-1} x_{k,i} e^{\frac{-j2\pi i \omega}{N}}$ де $x_{k,i}$ – значення i -ознаки k -го об'єкта.

Для прийняття рішення в багатоальтернативній ситуації використано математичний апарат Байєса. Зазначений підхід дозволяє приймати рішення на базі мінімально достатньої кількості інформації з визначеним порогом прийняття рішення V_{opt} .

У розробленому методі ефективної ширини спектра сигнал характеризують N ознаки, які можуть належати k -му об'єкту бази даних, тому ймовірність того, що відбудеться подія $Ssp_{k,i}=(x_1, x_2, \dots, x_N)$ рівна

$$P\left(\frac{Ssp_{k,i}}{Ssp_{l,i}}\right) = \frac{P(Ssp_{k,i}) f_{k,i}(Ssp_{l,i})}{\sum_{i=1}^K P(Ssp_{k,i}) f_{k,i}(Ssp_{l,i})}, \text{ за } V_{opt} \leq P\left(\frac{Ssp_{k,i}}{Ssp_{l,i}}\right), \quad (8)$$

де $f(Ssp_{k,i}) = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \prod_{i=0}^N e^{\frac{-(Ssp_{l,i} - Ssp_{k,i})^2}{2\sigma_k^2}}$ – щільність розподілу спектрального представлення вхідного сигналу; $Ssp_{l,i}$ – спектр сигналу, що прийшов на вхід системи; $Ssp_{k,i}$ – спектр сигналу з бази даних.

Апостеріорну ймовірність класифікації об'єкта до заданого класу визначено як:

$$P\left(\frac{Ssp_{k,i}}{Ssp_{l,i}}\right) = \frac{\frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \prod_{i=0}^N e^{\frac{-(Ssp_{l,i} - Ssp_{k,i})^2}{2\sigma_k^2}}}{\sum_{i=1}^K \left(\frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \prod_{i=0}^N e^{\frac{-(Ssp_{l,i} - Ssp_{k,i})^2}{2\sigma_k^2}} \right)}. \quad (9)$$

Результати ідентифікації голосу оператора безпілотного літального апарату оцінюють відповідно до значень класичних порогів прийняття рішень розрахованих для визначеної кількості гіпотез [9, 10].

Використовуючи Байєсівський математичний апарат, розраховується значення щільності розподілу для всіх елементів бази та апостеріорні ймовірності належності вхідного сигналу $Ssp_{l,i}$ до класу об'єктів бази даних (рис. 1).

Послідовність процедури реалізації методу ефективної ширини спектру, представлено його структурно-аналітичною моделлю на рис.1.

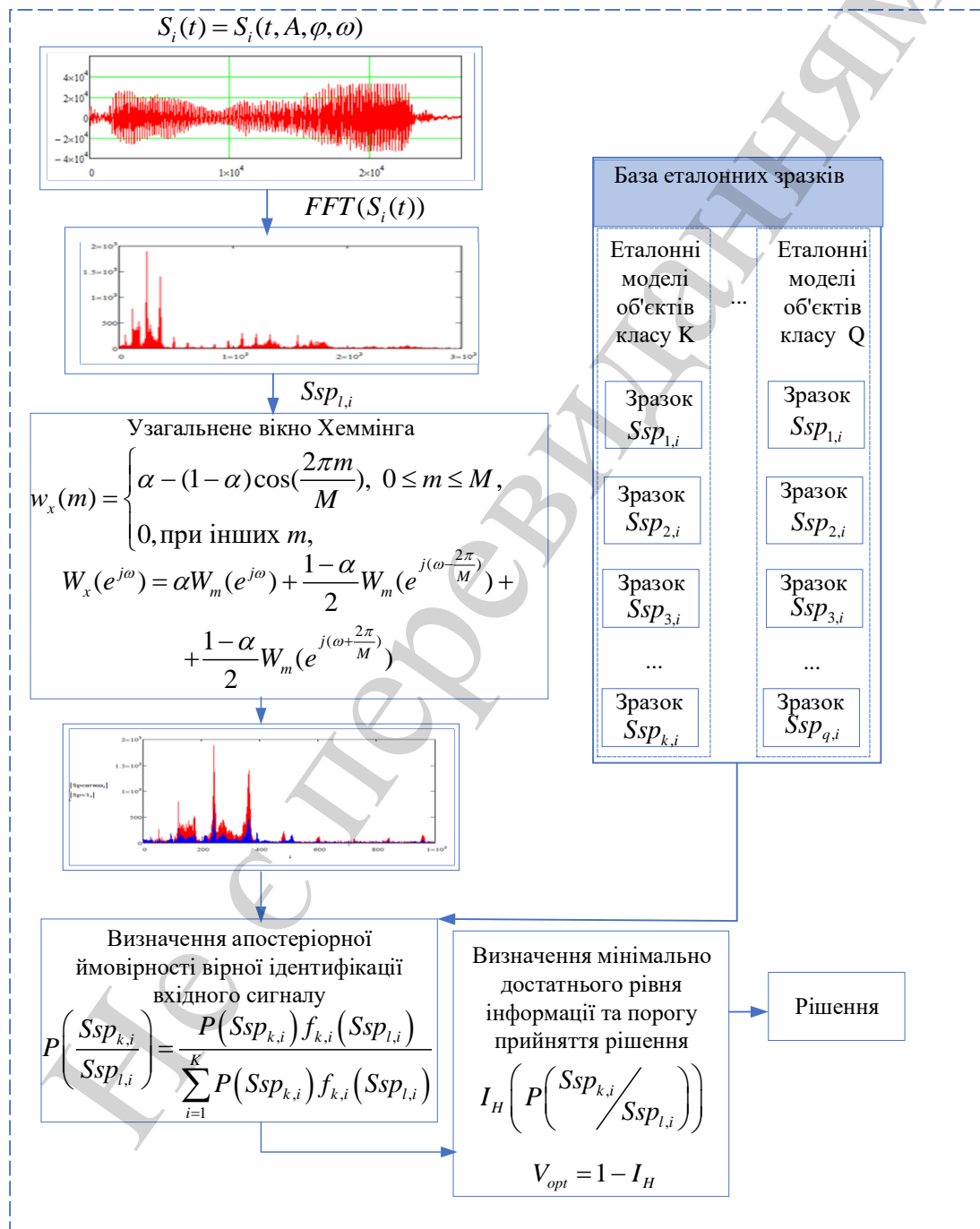


Рис. 1. Структурно-аналітична модель реалізації методу ефективної ширини спектру

Таким чином, розроблений метод дозволяє ідентифікувати оператора безпілотного літального апарату за голосом в умовах, коли співвідношення сигнал/шум SNR ($SNR \backslash \text{Signal-to-noise ratio}$) = $-5,22$ дБ.

6. Розробка методу найбільшої інформаційної ваги основного тону

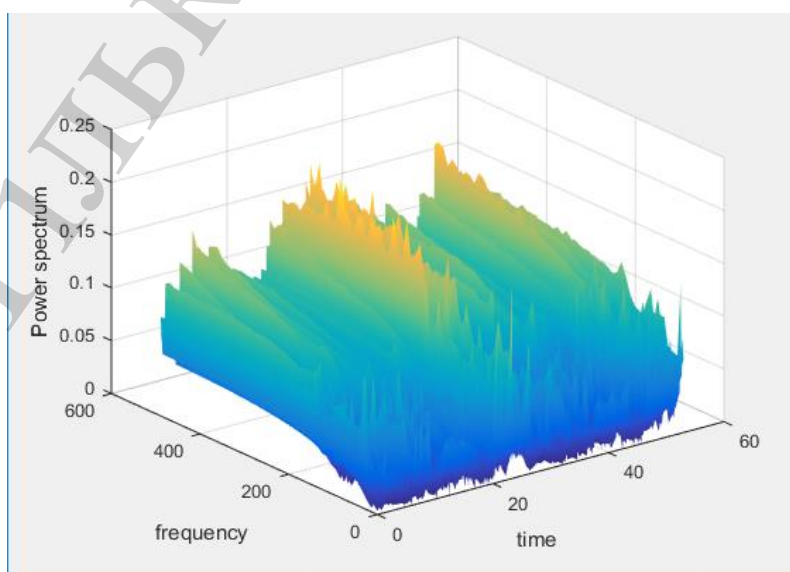
Розроблено метод найбільшої інформаційної ваги основного тону на базі багатоальтернативних правил прийняття рішень за визначеними, найбільш інформативними біометричними ознаками. Це дозволяє здійснювати ідентифікацію оператора безпілотного літального апарату за менших часових витрат, порівняно з методом ефективної ширини спектра.

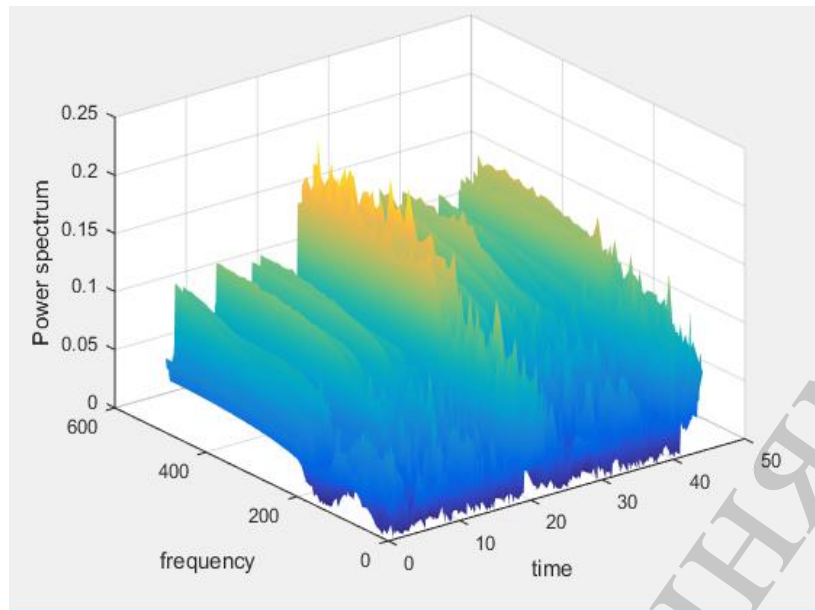
У процесі вирішення завдань ідентифікації оператора було вирішено питання використання біометричних характеристик голосового тракту в якості ознак ідентифікації диткора.

Встановлено, що фізичний зміст утворення голосу такий, що зі збільшенням часу змінюється амплітуда збудження і тривалість кожного наступного періоду основного тону nT_0 . Відхилення у зміні періоду основного тону у здорових людей знаходяться в діапазоні 0.1–1 %. У людей з деякими захворюваннями гортані цей діапазон може значно змінюватись [29].

В основу розробленого методу покладено спектральний аналіз сигналів (рис. 2) та визначення частоти основного тону як індивідуальної ознаки ідентифікації особистості за голосом. Для цього здійснюємо формування словника портретів базових команд управління БПЛА. Наприклад: «Зліт», «Посадка», «Автопілот», «Маршрут один», «Маршрут два». Місце бази еталонних зразків представлено на рис. 3, який відображає суть реалізації методу найбільшої інформаційної ваги частоти основного тону (ЧОТ).

На стаціонарній ділянці вокалізованого сигналу за низького рівня шумів форма мовленнєвого коливання майже точно повторюється на кожному черговому періоді основного тону. Відстань між глобальними максимумами мовленнєвого сигналу можна приблизно вважати такою, що дорівнює періоду основного тону.





б

Рис. 2. Спектральне представлення: а – вхідного; б – еталонного сигналів

Таким чином, для визначення частоти основного тону знаходимо максимальне значення амплітуди вхідного відфільтрованого сигналу A_{\max} та точки, які відповідають значенню локального мінімуму a_1 , а їх значення за модулем відрізняються від A_{\max} менш ніж на 10 дБ.

Отримавши послідовність $a_1, a_2, \dots, a_{n \geq 5}$, причому дві суміжні відстані в цій послідовності відрізняються менш ніж на 15 % (умова періодичності), визначаються

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{1}{n} (x_1 + \dots + x_n), \text{ для } n \geq 5. \quad (10)$$

Розрахунок \bar{a} на різних ділянках мовленнєвого сигналу може відрізнитись, тому обирається мінімальне \bar{a}_{\min} , для максимальної частоти основного тону – F_h . Таким чином, знаходимо всі локальні мінімуми з від'ємними значеннями амплітуди в обраних межах.

Після виконання розрахунків частоти основного тону та його періоду відфільтруємо спектр представленого сигналу, виділивши основні складові та розрахуємо апостеріорні ймовірності приналежності вхідного сигналу до визначеного класу об'єктів.

Враховуючи, що простором ознак є окремі складові спектрального представлення мовленнєвого сигналу $(f_0 + (nT_0 \pm \Delta f))$, отримано амплітудно-частотні

характеристики вхідного та еталонного

$$Ssp_{l,i} = \sum_{i=0}^{N-1} x_{l,i} e^{\frac{-j2\pi i(f_0 + (nT_0 \pm \Delta f))}{N}}$$

$Ssp_{k,i} = \sum_{i=0}^{N-1} x_{k,i} e^{\frac{-j2\pi i(f_0 + (nT_0 \pm \Delta f))}{N}}$ сигналів для розрахунку апостеріорних імовірностей класифікації об'єктів методом найбільшої інформаційної ваги основного тону (рис. 3).

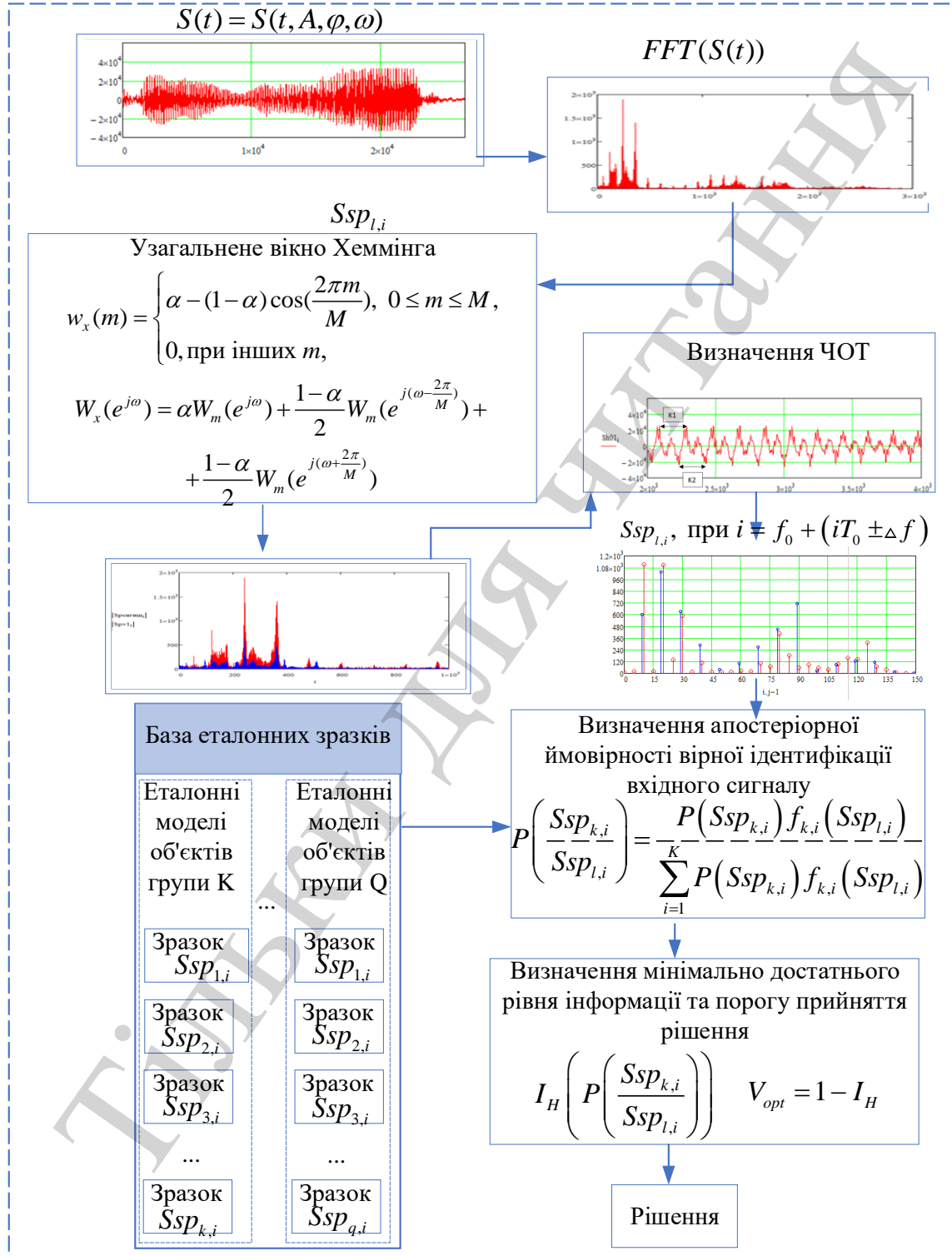


Рис. 3. Структурно-аналітична модель реалізації методу найбільшої інформаційної ваги частоти основного тону (ЧОТ)

7. Обговорення результатів впровадження методів ідентифікації аудіо характеристик вокалізованого сигналу оператора БПЛА

В якості експерименту, для оцінки ефективності розроблених методів обрано зразок запису жіночого голосу оператора, який підлягає ідентифікації та аутентифікації. Вхідні сигнали, отримані системою, позначимо як $S_{\text{вх1}}(t)$ та $S_{\text{вх2}}(t)$ залежать від наступних загальновідомих параметрів t, A, ϕ, ω . Зразки еталонів голосу санкціонованого оператора позначаються $S_{\text{вх1}}(t)=S_{\text{ет}}(t)$, а $S_{\text{вх2}}(t) \neq S_{\text{ет}}(t)$ та зберігаються в еталонній базі сигналів, що дає можливість провести ідентифікацію та аутентифікацію для методу ефективної ширини спектру та методу найбільшої інформаційної ваги основного тону.

Незалежно від використовуваного методу, нехай на вхід системи по чергово приходять сигнали $S_{\text{вх1}}(t)$ та $S_{\text{вх2}}(t)$, які підлягають аналізу та визначенню їх належності до множини значень $DB=\{A,B\}$, де $A=\{S_m(t)_1, S_m(t)_2, S_m(t)_3, \dots, S_m(t)_n\}$ – множина зразків чоловічих голосів, а $B=\{S_w(t)_1, S_w(t)_2, S_w(t)_3, \dots, S_w(t)_n\}$ – множина зразків жіночих голосів, відповідно. В експерименті використовувалось дванадцять аудіозаписів, серед яких вісім жіночих і чотири чоловічих. Тобто, використано 12 альтернативних гіпотез H_1 – H_{12} у багатоальтернативних статистичних правилах.

Специфіка будови всіх систем запису аудіосигналів припускає наявність завад створених самою системою, звуками навколишнього середовища під час запису. У такому разі оцінити ефективність роботи системи можна використовуючи співвідношення сигнал/шум (SNR) [13, 14, 25].

Нехай в базі даних існує запис, зроблений голосом тієї ж людини $S_{\text{ет}}(t)$, то будемо вважати його за еталонний. Таким чином маємо множину жіночих голосів $B=\{S_{\text{ет}}(t), S_w(t)_1, S_w(t)_2, \dots, S_w(t)_m\}$.

Показники ідентифікації диктора за допомогою розроблених методів при використанні 20 ключових текстозалежних, а також текстонезалежних команд, представлені в табл. 1. Текстозалежними командами будемо вважати такі вокалізовані сигнали, що відповідають певному переліку стандартизованих команд управління БПЛА. За текстонезалежні команди, приймаються команди на тлі вільної мови оператора в визначений період часу ($T=3$ – 10 сек.)

На основі розробленого програмно-апаратного комплексу математичного моделювання процесів (спеціалізоване ПЗ, мови програмування C++, РТС Mathcad | Mathcad) на основі впровадження розроблених методів ідентифікації, отримані наступні результати:

1) Імовірність вірної ідентифікації жіночого голосу $S_{\text{вх1}}(t)$ та $S_{\text{вх2}}(t)$ в множині DB становить 100% у випадку коли $\text{SNR} = -5,22$ дБ для методу ефективної ширини спектру і $\text{SNR} = -5,26$ для методу найбільшої інформаційної ваги основного тону, і тільки після того починає знижуватись.

2) Частота основного тону та обертони використовуються як основні інформативні складові у процесі ідентифікації людини за голосом, що дає можливість знехтувати іншою частиною спектру. Використання методу найбільшої інформаційної ваги основного тону дає можливість ідентифікувати голос за співвідношення сигнал/шум у $-5,21$ дБ, що зменшує ефективність текстонеа-

лежної ідентифікації всього на 2,1%, і зовсім не впливає на ймовірність текстозалежної ідентифікації.

3) Зразки чоловічих та жіночих голосів знаходяться в різних частотних діапазонах, тому доцільно було розділити їх на дві підмножини А та В. Результат експерименту показав, що точна ідентифікація голосу можлива коли SNR становить -5,29 дБ для текстозалежного випадку і -2,95 дБ для текстонезалежного для методу ефективної ширини спектру. Визначена динаміка прослідковується і для методу найбільшої інформаційної ваги основного тону, відповідно показники SNR становлять 5,7 дБ та 5,24 дБ. Отже, виходячи із вищесказаного, можна зробити висновки, що розділення бази даних на дві множини з різними групами зразків дасть можливість підвищити ефективність роботи системи на 16 % для текстонезалежної ідентифікації та на 2,4% для текстозалежної.

Таблиця 1

Показники ідентифікації диктора за допомогою розроблених методів

№	SNR, дБ	Метод ефективної ширини спектра		Метод найбільшої інформаційної ваги основного тону	
		Текстозалежна ідентифікація	Текстонезалежна ідентифікація	Текстозалежна ідентифікація	Текстонезалежна ідентифікація
1	- 2,88	1	1	1	0,99
2	- 5,22	1	0,97	1	0,95
3	- 6,59	0,99	0,91	0,99	0,91
4	- 7,93	0,99	0,82	0,98	0,65
5	- 8,9	0,98	0,69	0,97	0,64
6	- 10,18	0,95	0,55	0,96	0,52
7	- 11,46	0,85	0,46	0,9	0,5
8	- 12,65	0,85	0,39	0,87	0,32
9	- 14,63	0,65	0,25	0,67	0,23
10	- 16,27	0,52	0,14	0,6	0,22
11	- 17,53	0,45	0,16	0,4	0,16

В роботі було визначено, що на даний час відсутні методи організації системи управління БПЛА на основі аудіо команд оператора. Особливістю та відмінною аналітичною рисою розроблених методів та моделей, є те, що вирішення поставлених задач ґрунтувалось на базі послідовних статистичних правил прийняття рішень з використанням найбільш інформативних складових спектру. На відміну від існуючих методів, базовою платформою було створення словника ознак в спектральній площині управляючих повідомлень санкціонованого оператора БПЛА, а також формування порогових значень з урахуванням багатоальтернативних правил.

Отриманні результати є наслідком розробки нових методів і засобів захисту критичної інформації та управляючих сигналів БПЛА, яка передається з бортового сегменту на наземний (відео, аудіо, інші види даних) комплекс в режимі реального часу.

Недоліком розроблених моделей може бути генерація не санкціонованими операторами різного класу та походження штучних завад. Прикладом таких методик є хаотичні імпульсні завади, а також навмисна штучна генерація мовленнєвого сигналу санкціонованого диктора БПЛА з метою перехоплення сигналів управління.

Таким, чином формується напрям подальших досліджень, а саме – підвищення стійкості розроблених методів та моделей к різним класам штучних завад з урахуванням тактичного часу використання БПЛА в зонах критичних маршрутів.

9. Висновки

1. Розроблено метод ефективної ширини спектру мовленнєвого сигналу, який дозволяє здійснювати ідентифікацію та верифікацію оператора безпілотного літального апарата на основі аналізу інформативних складових відбитків голосу в умовах високого рівня завад різного походження.

2. Розроблено метод найбільшої інформаційної ваги основного тону, в основі якого лежить використання найбільш інформативних складових спектрального представлення відбитків мовленнєвого сигналу.

Література

1. Harrington, A. (2015). Who controls the drones? Engineering & Technology, 10 (2), 80–83. doi: <https://doi.org/10.1049/et.2015.0211>
2. Vattapparamban, E., Guvenc, I., Yurekli, A. I., Akkaya, K., Uluagac, S. (2016). Drones for smart cities: Issues in cybersecurity, privacy, and public safety. 2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). doi: <https://doi.org/10.1109/iwcmc.2016.7577060>
3. Долгих, В. С., Коньшев, Д. С., Филь, С. А. (2018). Перспективы развития беспилотной транспортной авиации. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии, 80, 23–28. URL: <http://journals.nupp.edu.ua/sunz/about>
4. Животовський, Р. М. (2016). Удосконалена методика адаптивного управління параметрами сигналу для безпілотних авіаційних комплексів. Системи управління, навігації та зв'язку, 3, 140–145.
5. Книш, Б. П., Кулик, Я. А., Барабан, М. В. (2018). Класифікація безпілотних літальних апаратів та їх використання для доставки товарів. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 3, 246–252. URL: http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2018/2018_3/jrn/pdf/42.pdf
6. Кудрявцев, Д. П., Рахман Мохаммади Фархади (2017). Беспроводные сети для передачи сигналов телеметрии на наземную станцию беспилотных летательных аппаратов: организация и программно-аппаратные средства. Радиоэлектронні і комп'ютерні системи, 3, 36–48. URL: <http://nti.khai.edu/ojs/index.php/reks/article/view/595/645>

7. Лавриненко, А. Ю., Кочергин, Ю. А., Конахович, Г. Ф. (2018). Система распознавания стенографически-преобразованных голосовых команд управления БПЛА. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 3 (87), 20–28. doi: <https://doi.org/10.32620/reks.2018.3.03>
8. Barannik, V., Yudin, O., Boiko, Y., Ziubina, R., Vyshnevskaya, N. (2018). Video Data Compression Methods in the Decision Support Systems. *Advances in Computer Science for Engineering and Education*, 301–308. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_30
9. Yudin, O. K., Ziatdinov, Y. K., Voronin, A. N., Ilyenko, A. V. (2016). Basic Concepts and Mathematical Aspects in Channel Coding: Multialternative Rules. *Cybernetics and Systems Analysis*, 52 (6), 878–883. doi: <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9889-z>
10. Yudin, O. K., Ziatdinov, Y. K., Voronin, A. N., Ilyenko, A. V. (2016). A Method for Determining Informative Components on the Basis of Construction of a Sequence of Decision Rules. *Cybernetics and Systems Analysis*, 52 (2), 323–329. doi: <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9830-5>
11. Yudin, O., Boiko, Y., Ziubina, R., Buchyk, S., Tverdokhlebova, V., Beresina, S. (2019). Data Compression Based on Coding Methods With a Controlled Level of Quality Loss. 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). doi: <https://doi.org/10.1109/atit49449.2019.9030431>
12. Yudin, O., Frolov, O., Ziubina, R. (2015). Quantitative quality indicators of the invariant spatial method of compressing video data. 2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T). doi: <https://doi.org/10.1109/infocommst.2015.7357320>
13. Yudin, O., Ziubina, R., Buchyk, S., Frolov, O., Suprun, O., Barannik, N. (2019). Efficiency Assessment of the Steganographic Coding Method with Indirect Integration of Critical Information. 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). doi: <https://doi.org/10.1109/atit49449.2019.9030473>
14. Hartmann, K., Giles, K. (2016). UAV exploitation: A new domain for cyber power. 2016 8th International Conference on Cyber Conflict (CyCon). doi: <https://doi.org/10.1109/cycon.2016.7529436>
15. Oleynikova, H., Burri, M., Taylor, Z., Nieto, J., Siegwart, R., Galceran, E. (2016). Continuous-time trajectory optimization for online UAV replanning. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). doi: <https://doi.org/10.1109/iros.2016.7759784>
16. Xue, X., Lan, Y., Sun, Z., Chang, C., Hoffmann, W. C. (2016). Develop an unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 128, 58–66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.07.022>
17. Mogili, U. R., Deepak, B. B. V. L. (2018). Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture. *Procedia Computer Science*, 133, 502–509. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.063>

18. Farlik, J., Kratky, M., Casar, J., Stary, V. (2019). Multispectral Detection of Commercial Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*, 19 (7), 1517. doi: <https://doi.org/10.3390/s19071517>
19. Izquierdo, A., del Val, L., Villacorta, J. J., Zhen, W., Scherer, S., Fang, Z. (2020). Feasibility of Discriminating UAV Propellers Noise from Distress Signals to Locate People in Enclosed Environments Using MEMS Microphone Arrays. *Sensors*, 20 (3), 597. doi: <https://doi.org/10.3390/s20030597>
20. Bernardini, A., Mangiatordi, F., Pallotti, E., Capodiferro, L. (2017). Drone detection by acoustic signature identification. *Electronic Imaging*, 2017 (10), 60–64. doi: <https://doi.org/10.2352/issn.2470-1173.2017.10.imawm-168>
21. Vattapparamban, E., Guvenc, I., Yurekli, A. I., Akkaya, K., Uluagac, S. (2016). Drones for smart cities: Issues in cybersecurity, privacy, and public safety. 2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). doi: <https://doi.org/10.1109/iwcmc.2016.7577060>
22. Bernardini, A., Mangiatordi, F., Pallotti, E., Capodiferro, L. (2017). Drone detection by acoustic signature identification. *Electronic Imaging*, 2017 (10), 60–64. doi: <https://doi.org/10.2352/issn.2470-1173.2017.10.imawm-168>
23. Kim, Y., Ha, S., Kwon, J. (2015). Human Detection Using Doppler Radar Based on Physical Characteristics of Targets. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12 (2), 289–293. doi: <https://doi.org/10.1109/lgrs.2014.2336231>
24. Izquierdo, A., Villacorta, J., del Val Puente, L., Suárez, L. (2016). Design and Evaluation of a Scalable and Reconfigurable Multi-Platform System for Acoustic Imaging. *Sensors*, 16 (10), 1671. doi: <https://doi.org/10.3390/s16101671>
25. Yudin, O., Symonychenko, Y., Symonychenko, A. (2019). The Method of Detection of Hidden Information in a Digital Image Using Steganographic Methods of Analysis. 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). doi: <https://doi.org/10.1109/atit49449.2019.9030479>
26. Busset, J., Perrodin, F., Wellig, P., Ott, B., Heutschi, K., Rühl, T., Nussbaumer, T. (2015). Detection and tracking of drones using advanced acoustic cameras. *Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks XI; and Advanced Free-Space Optical Communication Techniques and Applications*. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2194309>
27. Shakhathreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I. et. al. (2019). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *IEEE Access*, 7, 48572–48634. doi: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2909530>
28. Fang, Z., Yang, S., Jain, S., Dubey, G., Roth, S., Maeta, S. et. al. (2016). Robust Autonomous Flight in Constrained and Visually Degraded Shipboard Environments. *Journal of Field Robotics*, 34 (1), 25–52. doi: <https://doi.org/10.1002/rob.21670>
29. Сорокин, В. Н., Вьюгин, В. В., Тананыкин, А. А. (2012). Распознавание личности по голосу: аналитический обзор. *Информационные процессы*, 12 (1), 1–30. URL: <http://www.jip.ru/2012/1-30-2012.pdf>